

音波のよもやま話 (その9)

各種パルサーと探触子からの音 (2)

Sound form transducer excited by various pulsers(2)

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

今回は実験によく使うMHz帯域用のパワー・アンプによる励振駆動と発生音を中心に述べる。この周波数帯のアンプは、出力インピーダンスが低いタイプと、50Ω系にマッチングさせたタイプに大きく分かれる。パワー・アンプの商品名称はジャンルやメーカーに拠り異なる。入出力直線性が高い場合は高周波リニア・アンプと呼ばれる場合が多い。リニアと言っても数%の歪みはある。出力は歪が10%程度になる時の値で、大きな信号では歪が大きくなるので注意が必要である。

◆出力インピーダンスの低いアンプ

元来如何なるアンプも図1の実線のように高周波ほど増幅度が低い。矩形波を増幅すると、立ち上がり立ち下りが訛る。それを補償して、きれいな矩形波の出力が観測できる様に設計している。具体的にはピーキングと言う技術などで高域増幅度が下がる部分を上げて破線の様

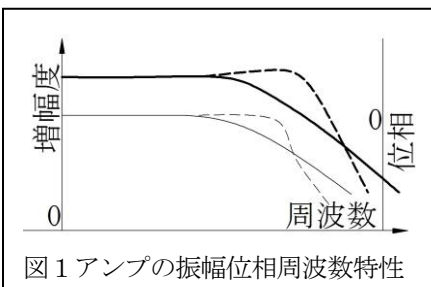


図1 アンプの振幅位相周波数特性

周波数では急に増幅度が下がると同時に、その付近では位相の変化が激しい。位相歪が多いとも言える。図に位相特性例を細線で示す。多くのパルサー・レシーバに使われている広帯域アンプも同様の細工がされているので、帯域上限近くで使用する場合は注意が必要である。如何なる増幅器も周波数が上がると、増幅度は下がる。これが自然であり、無理にハード的に補正する

より、測定結果を補正した方がより良い実験成果が得られよう。

多くのファンクション・ジェネレータ(FG)の最大出力電圧は10V程度である。これより高い電圧で振動子を駆動したい場合、FGの後にパワー・アンプを繋ぎ、電圧増幅する。10MHz程度までなら高周波用の増幅直線性が良いパワー・アンプが存在する。高周波電源とアンプとは思えない名称で売られている場合もある。前回述べたようにFGは極低い出力インピーダンスの増幅直線性の良いアンプ出力を50Ωの抵抗を通して、出力端子に繋げている。その為、常に出力インピーダンスを50Ωに保てる。通常のパワー・アンプはFG同様の構成はとっていない。50Ω抵抗を入れると、それが電力消費するので、アンプ最大出力電力を有効に使用できない。負荷に長い50Ωのケーブルが繋がらないなら、出力インピーダンスが50Ωである必要性はない。あくまで出力電力を大きくしたい。例えば図2の様

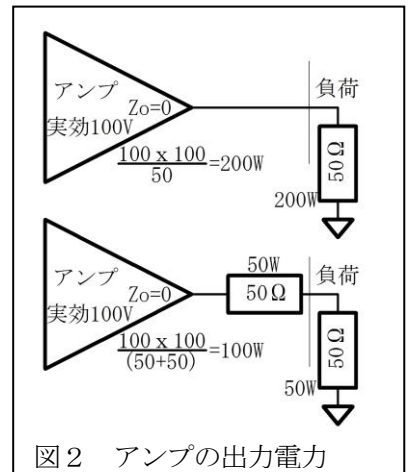


図2 アンプの出力電力

に実効100Vで50Ωの負荷を駆動できるアンプは、アンプに直接50Ω負荷を繋ぐと、前回にも示した次式(1)により200Wの出力が得られる。FG同様に内部に50Ω抵抗が入った構成の場合、外部負荷が50Ωの場合に負荷に最大電力が供給できるが、内部と外部両方の抵抗全体で100W

の電力消費となる。負荷の抵抗にはその半分の 50W しか供給できない。アンプの最大供給能力の 1/4 となる。

$$P = R \times I^2 = \frac{V^2}{R} \quad \text{式 (1)}$$

短いケーブルを出力に接続して使う様な用途では、50Ω の抵抗を入れなければ有効に電力を負荷に送れるのである。なお、アンプが電流飽和しないと仮定した。実際は電流飽和特性も考慮する必要がある。

負荷が振動子の場合、ケーブルを伸ばさなければ、低い出力インピーダンスの御蔭で、ほぼ思う波形で振動子を励振できる。振動子に矩形の様な角張ったパルス波形を印加する場合は、

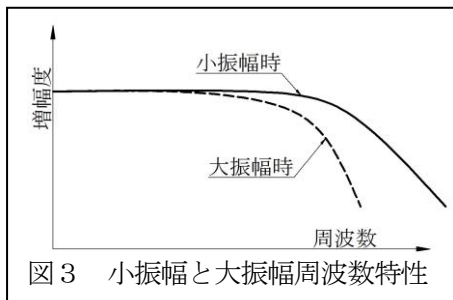


図3 小振幅と大振幅周波数特性

基本の10倍程度の帯域がよければ

う。一般にアンプのカタログでは、小振幅出力での周波数特性が示される。大振幅出力では図3の様に、周波数特性が悪くなる。最大電力又は大振幅の周波数特性が別途明記されている場合もある。

◆出力インピーダンスが 50Ω 系アンプ

通信機器用のパワー・アンプはアンテナに接続する事が前提となっている。アンプは室内、アンテナは室外と距離があり、同軸ケーブルで配線する。その為出力インピーダンスは 50Ω 目標に設計している。FG の様に出力に 50Ω の抵抗を入れる方法は、前述の様に損失が大きいので使わない。また、高周波ではアンプの出力インピーダンスを下げることで自体が困難である。

最終段に使う半導体素子の出力インピーダンスを高周波トランスを使って 50Ω 近辺にする方法がとられる。高周波トランスの入出力のインピーダンス関係は図の4に示す様に、巻き線数の二乗比となる。一次側が 12.5Ω で二次側

を 50Ω の4倍にしたければ、1:2 の巻き線比のトランスを使えば良い。高周波

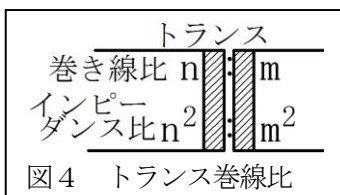


図4 トランス巻線比

ではトランスに巻く線の長さは周波数特性に影響し、余り長く出来ない。多くは一次又は二次が 10 巻き以下にしている。その為、細かなインピーダンス比の調整は難しい。トランスは DC 成分を通さないが、この高周波トランス自身の周波数帯域の上下限比は 1000:1 前後と広く、パルス波の伝搬も歪なく伝送できる。高周波パワー・アンプの出力に使う素子は多くは RFMOSFET と呼ばれるこれは MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor、電界効果トランジスタ)の仲間高周波アンプに特化した製品である。素子1個の出力は 100W 程度である。発熱するので、1個で大出力の物は少ない。100W のアンプが 2 個あれば、例えば図5の様にトランスで2倍に電力合成できる。市販の高出力のパワー・アンプを同様なテクニックを使っている。

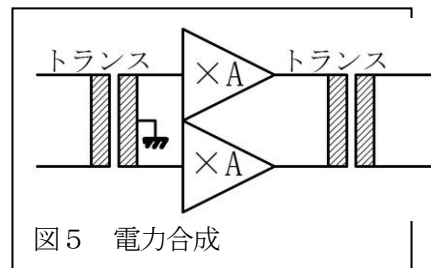


図5 電力合成

損失を無視すれば、2倍、4倍、16倍とアンプとトランスで出力電力を増やせる。100MHz の周波数で 100W でも 1kW でも設計製作できる。図6は筆者が約 30 年前に試作した

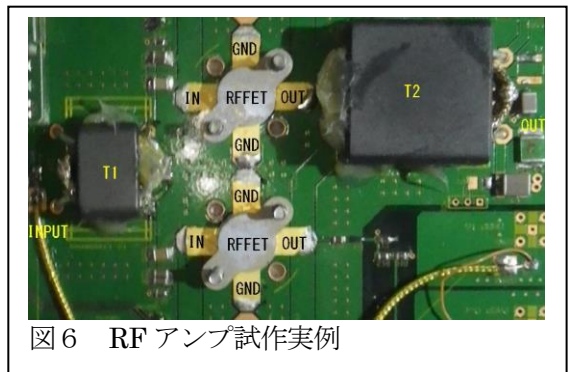


図6 RFアンプ試作実例

100MHz 200W のアンプである。RFMOSFET に付いていた放熱器を外したところで、入力トランス T1 と 2 つの RFMOSFET と出力トランス T2 で構成されている。大半の RFMOSFET は入出力ピンが直線的に配置され、その間に GND が付いていて、高周波電力の伝送と入出力のセパレーションを良くしている。リード線は板状である。高周波では表皮効果の為に表面直近に電流が集中する。因みに銅板では 10MHz

の電流の半分が表皮下 $20\mu\text{m}$ 内を流れる。金でも $25\mu\text{m}$ 程度である。インピーダンスを下げる為に表面積が必要なので、RFMOSFET は金メッキされた薄い板状の端子が使われている。高周波アンプのプリント基板の銅箔は特性インピーダンスを考慮してストリップライン構造をしている。板状端子の為 RFMOSFET からここへの接続も容易だ。パッケージはプラスチックでなく、セラミックで、放熱板を直接付けるネジ穴が付いている。

図7に示すこの RFMOSFET のスミスチャートを示す。入出力インピーダンスは周波数により抵抗に近い事もあるが、誘導性であったり、容量性であったりする。インピーダンスの絶対値や位相が変化する。試作した RFMOSFET では低い周波数 2MHz で 10Ω 程度の容量性であるが、 175MHz で 7Ω 程度の抵抗性になり、更に周波数が上がると誘導性となる。図の点線は入力インピーダンスである。同様に周波数で変化する。

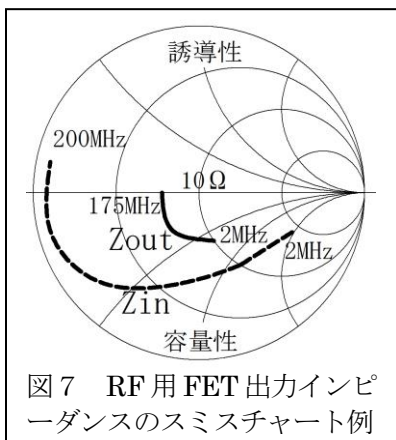


図7 RF用FET出力インピーダンスのスミスチャート例

市販の RF パワー・アンプでは出力インピーダンスの標準は 50Ω となっている。上記の様に使っている素子の出力インピーダンスが周波数で変

動するので、使用周波数帯で 50Ω に近くなる様に設計している。この変動はカタログで VSWR (Voltage Standing Wave Ratio、定在波比) として記載されている項目で確認できる。VSWR と反射率 Γ との関係は

$$\text{VSWR} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad \text{式(2)}$$

で、反射率が 0 の場合 VSWR は 1、反射率が ± 0.1 、 ± 0.2 の場合 VSWR は 1.2、1.5 となる。RF パワー・アンプ製品の VSWR は 1.2~1.5 が多い。 50Ω 系で VSWR 1.5 以下と言う事は、出力インピーダンス絶対値が $33\Omega \sim 75\Omega$ の間と言う事で、ケーブル両端反射が観測に強く影響する非破壊検査などでは特に注意が必要である。

更に市販の RF パワー・アンプの仕様で注意すべき項目は、最大出力電力である。20% 程度の歪となる条件で最大電力出力を規定している場合が多く、歪の少ない実験に使う場合は、最大電力から十分余裕を持った低い電力で使う必要がある。無線機器では不要歪を除去するのにアンプの出力とアンテナ間に鋭い周波数特性のフィルターを入れるのが常道で、元々アンプの歪をあまり気にしていない。不要成分はフィルターが除去すればよいとの考えである。

RF パワー・アンプの増幅直線性は中身の RFMOSFET そのままで、あまり良くない。増幅直線性は数% あると思った方が良い。前述の様に 10MHz 程度までの周波数なら、高電圧の高周波オペアンプで作られた高周波リニア・アンプが市販されている。図8の様にフィード・バック(帰還)を掛けて増幅直線性を 1% 以下と良くし、出

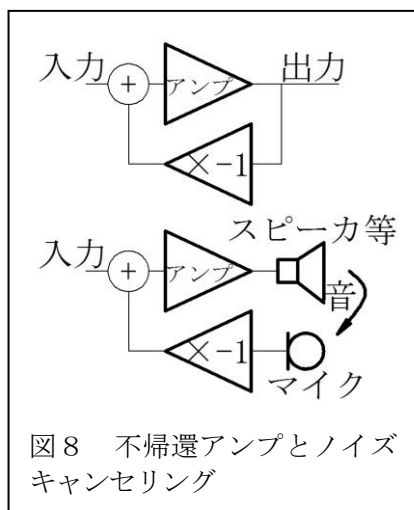


図8 不帰還アンプとノイズキャンセリング

力インピーダンスも非常に低い電圧駆動特性である。低い周波数では、この負帰還により増幅直線性を良く出来る。高い周波数になると、帰還回路の信号伝達時間が無視できず、上手に制御できない。その為、概略 10MHz 以上では、RFMOSFET で帰還を使わないアンプとなる。

ノイズキャンセリング・ヘッドホンは、マイクで拾った音と、音源の音が一致する様に帰還を掛けてノイズを打ち消している。これも高い周波数ではノイズを消せない。ヘッドホンのドライバー(音の発生の元部分)とマイク間の音の伝達時間が無視できず、帰還制御が間に合わない。スピーカも同様の負帰還で、音質を良く出来るのだが音の伝わる空間が広く、その音の伝搬遅れの為に、極低い周波数しか帰還制御できない。50年以上前の大昔、スピーカの前にマイクを配置して、制御するスピーカ・システムも実験された。高級車にはノイズキャンセラーが設備されているが、耳とスピーカの距離 1m

の 1/4 波長以下のエンジンの基本波以下は何とかキャンセルできる。

RFMOSFET を用いたパワー・アンプはトランス結合の為に、出力は低周波成分が減少する。DC 成分はゼロとなる。多くの振動子は分極電

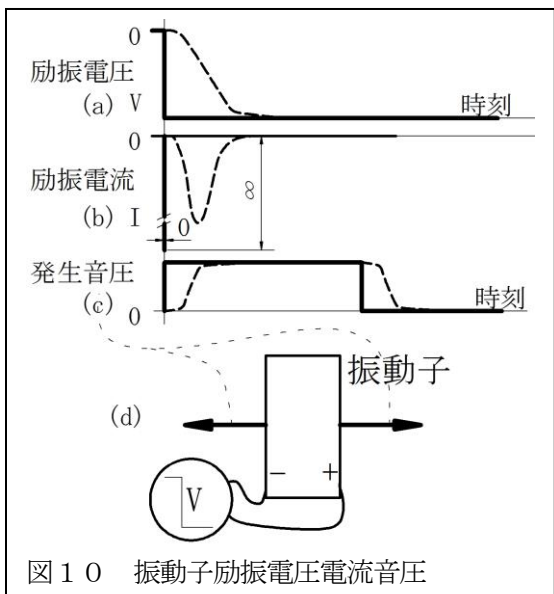


図 10 振動子励振電圧電流音圧

圧と逆方向に高い電圧が加わると分極が無くなる脱分極を起こす。例えば正の電圧には 500V

しか耐えられない振動子が負の電圧には 5kV でも耐えられる。それぞれの振動子素材と音響構造で異なるので、実際に使う振動子の耐圧はメーカなどに確認必要である。

大きな出力電圧を振動子に印加する場合は、出力に DC バイアスを加える必要がある。RF パワー・アンプなどの出力がフローティングされている機種が少なく、一般的には図 9 に示すコンデンサーかトランスにより RF パワー・アンプからの DC を切断して、DC バイアス印加をする。バイアス電圧は振動子が逆分極しない様な適切な電圧とする。使うコンデンサーは周波数特性が良い、振動子より容量が十分大きいものを使う。トランスも周波数特性が良く、使用周波数範囲で振動子のインピーダンスより十分高いインピーダンスのものとする。この DC バイアスにより、脱分極しない分大きな音圧の音が出せる。

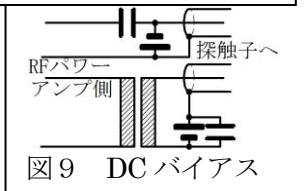


図 9 DC バイアス

◆インパルス応答、インディシャル応答

{音波のよもやま話 (その 7) 振動子、探触子からの音の発生} で説明したように、出力インピーダンスの小さいステップ関数状駆動やスパイク駆動で、急峻な時間幅の狭い電流パルスが流れ、結果振動子の厚さ相当の音圧が振動子から発生する。再度図 10 に示す。理想のステップ関数状励振では、時間幅ゼロで無限大振幅の電流が流れるが、実際には破線の様に立下り時間をもったスロープのあるステップ電圧が観測され、その分電流は時間幅の広がった立下り立ち上がり時間のあるパルス電流が流れる。発生音波の理想は矩形波であるが、実際は訛った台形となる。ステップ電圧が加わった瞬間に振動子厚さ全体が一定の圧になる。それが津波同様に振動子の両面から音圧として伝わる。

振動子の径方向にも振動するし、その影響が厚さ方向にも発生する事は以前述べた。が、話が複雑になるので当分その様な事は無いとしよう。厚さ方向にしか振動しない理想の異方性の振動子を前提に話を進める。

図 10 の波形(a)実線のステップ (関数) 波形に対する応答をインディシャル応答、波形(b)実線の様な幅の狭いインパルスによる応答をインパルス応答と呼び、制御工学における基本的応答で、何れかが分かれば、あらゆる入力波形に対する応答が求められる。インパルス応答とインディシャル応答は微分積分関係にあて、一方が分かれば良い。ロボットの制御などもこの関数を求め予測制御している。

スピーカの場合、直流電圧を加えるとボイス・コイルが焼けるので電圧インディシャル応答はできず、電圧インパルス応答が使われるが、振動子単独の場合は、単なるコンデンサーとみなせるので、電圧であればインパルス応答、インディシャル応答の何れも使える。振動子は MHz 帯と周波数が高く、強制電圧駆動のインパルス電圧の発生が大変なので、インディシャル応答の方が駆動回路は簡単となる。が、一部の探触子はインダクタンスを端子と並列に接続されており、この場合はステップ形状の波形の代わりにデュレーションの長いスパイク形状の波形や幅の極広いスクエア形状を用いる。通常スパイク型パルサーのパルス・エネルギーとダンピング抵抗を大きくした状態である。また、電圧インパルス応答だと、振動子に与えるエネルギーが小さいので、変化の少ない現象はノイズに埋もれる。

昔の高級スピーカの周波数特性は良くても、実際に聞くと最近のスピーカほど「切れ」が良くない。同じ音の良さで比べると、ここ 20 年で価格が 1/10 以下に成ったような気がする。

1980 年代頃か、米国のティール(Thiel)が位相の周波数特性を良くしようと図 10(b)同様のパルス波に対するスピーカのインパルス応答特性を調べ、スピーカ・システムを改良し始めた。この手法がスピーカ・メーカーに広がると、急速にスピーカの性能が良くなった。従来は単に周波数特性(正確には、振幅の周波数特性)のみ良くしようとしていたが、位相特性(位相歪)即ち位相の周波数特性を改善した。昔はスピーカと言うとボイス・コイルに紙パルプのコーンが付いたものであったが、現在は例えば音速の大きいアルミ箔をパルプ・コーンの上に貼るなどして、位相特性を改善している。高音用スピーカでは音速最大のダイヤモンドをコーティングした物まで販売されている。音速の早い材料ほど、ボイス・コイルの運動が時間遅れなく空気に伝わり HiFi な音になる。2 ウエイ・スピーカなどでは、高低音 2 つのスピーカの取付位置と人の耳までの距離の違いで位相歪が生じる。高低音 2 つのスピーカの取付位置を近づけたり、一個のスピーカに同軸状に高低音用スピーカを組み込むなど(同軸型スピーカと呼ばれる)、極力位相を合わす製品が増えている。

インディシャル応答やインパルス応答計測の便利なところは、一度に振幅と位相の両方の周波数特性が判る事である。図 10(c)の波形には、振動子の全ての振幅と位相の周波数特性が含まれているのである。連続波を使って周波数を変えながら何点も測定する必要はない。図 10 の場合、矩形波が観測できる場合は、使っている振動子は厚さ方向に、振動子材質が均一と言って良い。後述する様に実際の振動子は色々な応答を示す。

スピーカの場合、インパルスでは強力な音が発生しにくいので、強い音圧の発生時のスピーカの発熱による影響などを観測できない欠点もある。

振動子では、大電力ステップ関数の発生が容易なので、インディシャル応答で振動子が壊れる程度の

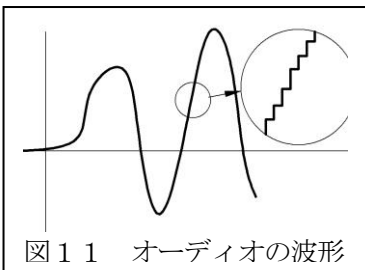


図 11 オーディオの波形

電圧を印加できる。それでも Q 値の極高い現象は応答でノイズ以下に成る事もあるので、注意が必要である。

◆励振波形と発生音圧

現在のオーディオでは CD やウェブからダウンロードしたデジタル・データを使って音を出している。耳には判らないが、聞こえてくる音のもとにはステップの連続、或いはステップの加算とも言ってもよい。振動子からの音もこのステップの加算と言う考えを用い、図で計算できる。図 1 2 は振動子の機械的共振周波数より低い周波数のサイン波形で励振した場合の先端の例である。

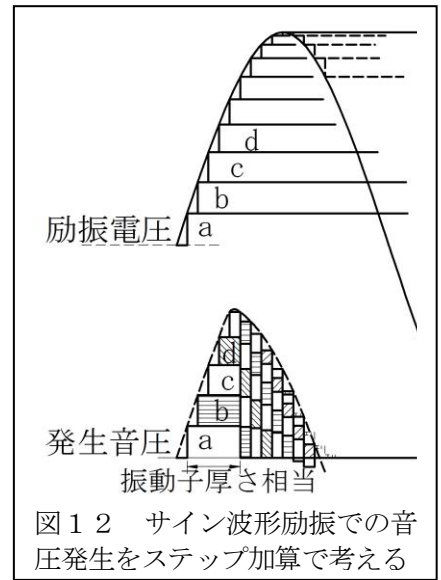


図 1 2 サイン波形励振での音圧発生をステップ加算で考える

励振電圧を a,b,c... と複数のステップに分割し、それぞれが、それぞれの振幅に比例した同じ時間幅の矩形音圧が発生するとして、図下の様に加算していく。励振電圧がピークから下がって行く場合は減算すると、送音音がどうなるかが判る。(a)以外は幅方向分割してある。

数学的には励振電圧を V、励振電流を I、振動子の厚さ関数を W とすると、

$$P(t) = (I * W)(t) = \left(\frac{\delta V}{\delta t} * W\right)(t) \quad \text{式(3)}$$

と *印の畳み込み積分(Convolution)の形で表せる。一般的計測機器を通過した信号 $Out(t)$ も入力 $In(t)$ と機器の特性 f の下記の畳み込み積分で表せるなど、色々が現象を計算できるので勉強すると便利である。

$$Out(t) = (In(t) * f)(t) \quad \text{式(4)}$$

図 1 2 で強制電圧駆動回路によるサイン・バースト電圧の先端の応答作図をした。サイン・

バーストでは先端はサインとは異なる音圧波形になる事が実験すると判る。

任意の励振電圧波形の場合は、均質な振動子では、式(3)に従い、振動子を実際に励振している電圧波形を観測し、その波形を微分して、振動子厚さ相当の時間をボヤカスと実際の音に近い結果が得られる。

◆振動子の出力音厚さ関数

水晶の様な単結晶振動子や粒界の小さなPZT等は厚さ方向均一なので、図10の様にインディシャル応答音波は矩形となる。電圧感度の低い振動子は図13の(a)の様に振幅が小さく、電

圧感度が高い振動子は(b)の様に応答振幅は大きい。

振動子の厚さが薄いと(c)の様に幅が狭くなる。振動子材料メーカーの波長定数や音速、音響インピーダンスのデータはあくまで電子部品として発振回路を作る場合に振動子厚さを求める等の計算の為に

ある。振動子から発生する音の振動周期を決めるには、カタログ値はそのまま使えない。共振周波数、反共振周波数から下式で再計算する必要がある。多くの探触子メーカーがカタログ波長定数から計算して手配している。50年昔は共振周波数と反共振周波数との差は誤差の範囲だったが、最近の感度の良い圧電素子はその差が大きい為、探触子の公称周波数から逆算した振動半周期幅より5~40%狭い矩形のインディシャル応答が観測される。

$$\text{実音速} = \text{カタログ音速} \frac{f_r}{f_c} \quad \text{式(4)}$$

ここに f_r は共振周波数、 f_c は反共振周波数
 圧電振動子は予備焼成して、一定の大きさの結晶粒を作り、これを練り固め再度焼成して板状にする。振動子厚さが相対的に予備焼成粒に

近いと(薄い振動子)、上面が凸凹した矩形波がインディシャル応答となる。図13(d)

厚い振動子では、焼成時表面から焼かれるので、内部が均一に焼けなかったり、析出などで表面と内部が少し異なる性質となる事がある。広帯域振動子に良く使われるニオブ酸系の圧電素子で起きやすい。大きさには図13(e)となるが、凹みの量は点線の様に最大振幅の数%以下の場合が多い。PZT系振動子は均質性が良く、ニオブ酸系は悪い傾向にある。稀に中央が全く感度の無いものがある。振動子の基本共振周波数の2倍の成分の音が出ている。が、一探触子法では受信時に基本共振周波数の奇数倍以外の感度が低い為、観測されない。二探触子法でのみ観測される。精度の高い実験をする場合、振動子の素性を予め詳しく調べておく必要がある。

1-3 や 2-2 コンポジット系など構造を持つ振動子では、例えばバインダーを伝わってくる音がセラミックを伝わる音より遅れるので、図9(f)となる。バインダーの種類や振動子とバインダーの体積比等で大幅に変化する。

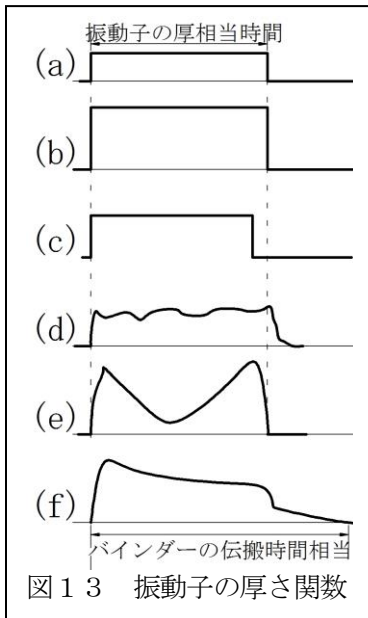


図13 振動子の厚さ関数

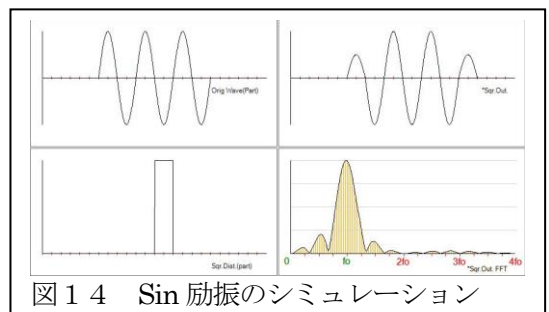


図14 Sin 励振のシミュレーション

記さなかったが、振動子の前後に振動子と同じ音響インピーダンスの材料が付いた状態を暗黙假定している。前後が異なる音響インピーダンスの例えばバックングや厚い整合層が波形に影響する。また、実際の振動子を強制電圧駆動は出来ないし、振動子内の音による発電現象の影響も最近の感度が高いPZTでは無視できない。振動子の一部に音があると、他の部分ではそれと逆の音圧が静電誘導と電歪効果で発生する。これらの場合の話は後編に譲る。広帯域探触子と呼ばれるものは、振動子後面に伝わる音はバックングで吸収され、前面の保護膜も薄いので、強制電圧駆動に近いパルサーで励振すると、前述の議論相当の音が観測される。

◆応答の例 (畳み込み積分)

図12の様な作図解析は大変なので、PCでシミュレーションする事にしよう。ウェブに

FFT のフリーライセンスソフトがあり、それを使った結果を示す。図 1 4 の左上のサイン波形 3 波で強制励振した広帯域探触子からの音を右上に示す。この場合、励振半周期と振動子厚さ/縦波音速を一致させている。振動子の厚さ関数が左下である。右下は右上の FFT 結果である。図 1 5 はオフセットさせたコサイン波形励振の場合で最初の半波音から振幅が一定にできる。連続波に近い場合発生音は印加電圧の微分に近い形となる。

図 1 6 はスクエア・パルサーの例で、励振電圧の幅周期で振動子厚さ相当の正負のパルス音圧が発生する。通常振動子インピーダンスより、パルサーの出力インピーダンスが低いので、周期は振動子に抛らずパルサーの矩形の幅次第と言う事である。送信周波数はスパイク・パルサーでは探触子依存が強く、スクエア・パルサーではパルサーに依存する。受信回路は共に似ているので、受信探触子の特性が主体になる。

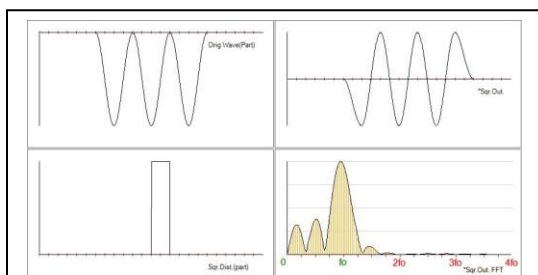


図 1 5 Cos 励振のシミュレーション

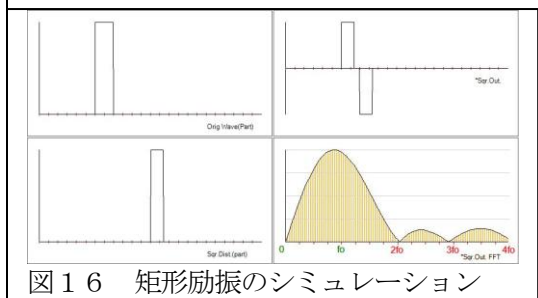


図 1 6 矩形励振のシミュレーション

◆あとかぎ

今回実験に良く使われるであろう高周波用パワー・アンプと、それが強制電圧駆動として、振動子から発生する音に関して述べた。またインディシャル応答、インパルスに関し述べた。次回は一般的肉厚計や探傷器に使うパルサーの話をする。

◆今回知った事

- (1) 超音波大電力実験に使うパワー・アンプの周波数上限付近での使用する場合、位相特性に注意
- (2) パワー・アンプの負荷とのマッチングには高周波トランスを使う
- (3) パワー・アンプの代わりに高周波 AC 電源や RF リニア・アンプも目的により実験に使える
- (4) パワー・アンプの使用時に正負の電圧が発生する場合、振動子が脱分極する恐れがあるのでバイアス回路を付加する
- (5) DC バイアスと加えると、より大きな音の発生ができる
- (6) 振動子の特性は電圧インディシャル応答を調べると良い
- (7) インパルス応答、インディシャル応答には振幅と位相と周波数特性が含まれている
- (8) 広帯域探触子からの音は振動子厚さと励振電圧波形の微分の畳み込み計算とよく合う
- (9) 精度の高い実験をする場合、振動子の素性を予め詳しく調べておく必要がある
- (10) スクエア・パルサーの送信音波の周期はパルサーの出力パルス幅で決まる
- (11) スパイク・パルサーの送信音波の周期は振動子で決まる
- (12) 受信に使用する振動子の厚さ相当の周波数の偶数倍の周波数は観測されない事が多いので注意
- (13) 音速、音響インピーダンス、波長定数の振動子メーカー・タログ値は非破壊医療超音波用に使う場合補正が必要。

<参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで(2015/04 初版 2 刷、日刊工業新聞社)